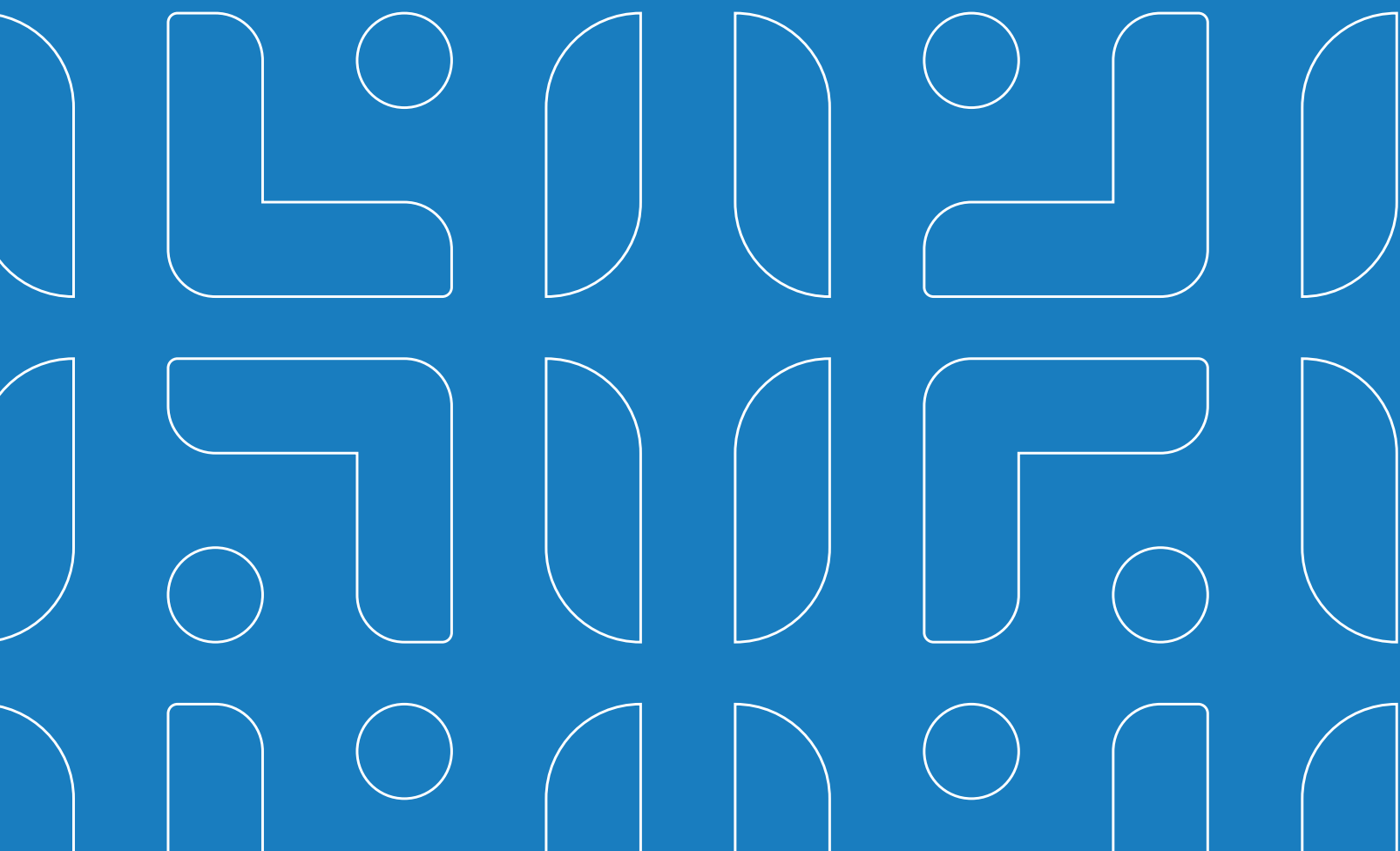


CIUDADES Y TERRITORIOS SOSTENIBLES



Análisis espacio-temporal del proceso de urbanización en la ciudad de Santa Tecla, El Salvador

<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8500>

Metzi Aguilar ¹

¹ Departamento de Organización de Espacio, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador
E-mail: maguilar@uca.edu.sv

Resumen — Este estudio tiene como objetivos analizar el proceso de urbanización en el municipio de Santa Tecla y proponer una metodología genérica con herramientas libres para que la población pueda realizar un monitoreo espacio temporal del proceso de urbanización de los municipios del área metropolitana de San Salvador utilizando imágenes satelitales Sentinel y el instrumento de planificación normativo vigente como referencia. Se analizó la evolución espacio temporal de 30 años (1991-2021) de la mancha urbana quinquenal del municipio Santa Tecla utilizando datos satelitales Landsat y se contrastó con los instrumentos normativos vigentes o técnicos de referencia. A partir de los índices NDVI y NDBI calculados con datos satelitales Sentinel-2 y aplicando una metodología híbrida de clasificación de imágenes se identificaron conflictos en el uso actual del suelo con alta resolución. El estudio concluyó que el proceso de urbanización en el municipio de Santa Tecla ha sido desordenado en los últimos 30 años, lo que ha aumentado el riesgo para la población, debido a que aunque se cuenta con un marco legal de ordenamiento territorial su aplicación ha sido flexible. Se ha utilizado un método híbrido de clasificación a partir del NDVI y el NDBI de imágenes satelitales para simplificar la inspección manual de la zona en un período de tiempo determinado con un margen de error aceptable.

Palabras Clave – clasificación de imágenes, evolución espacio-temporal, NDBI, NDVI, Sentinel-2, teledetección, urbanización

Abstract — This study aims to analyze the urbanization process in the municipality of Santa Tecla and propose a generic methodology with free tools so that the population can monitor the spatio-temporal process of urbanization in the municipalities of the metropolitan area of San Salvador using Sentinel satellite images and the current regulatory planning instrument as a reference. The evolution of the 30-year temporal space (1991-2021) of the five-year urban sprawl of the municipality of Santa Tecla was analyzed using Landsat satellite data and contrasted with current regulatory instruments or reference techniques. NDVI and NDBI indices calculated from Sentinel-2 satellite data and applying a hybrid image classification methodology, conflicts in real land use were identified with high resolution. The study concluded that the process in the municipality of Santa Tecla has been disorderly in the last 30 years, which has suspected the risk for the population, because although there is a legal framework for land use planning, its application has been flexible. A hybrid method of classification based on NDVI and NDBI from satellite images has been used to simplify the manual inspection of the area in a given period of time with an acceptable margin of error.

Keywords — images classification, NDBI, NDVI, remote sensing, Sentinel-2, spatio-temporal evolution, urbanization

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, técnicas como la teledetección y el aprendizaje automático permiten obtener y clasificar imágenes satelitales, cuantificarlas y medir el crecimiento urbano para un período dado, lo que facilita la evaluación del contraste del uso real del territorio con el de las directrices planteadas en los instrumentos de planificación. Además, existen proveedores de imágenes satelitales libres a nivel global como la Agencia Espacial Europea o el servicio geológico de Estados Unidos (USGS) que permiten aplicar dichas técnicas a sus productos. Investigaciones recientes han identificado exitosamente la mancha urbana en otras regiones utilizando técnicas de teledetección, como el uso de índices de vegetación/edificabilidad [1,2] y el geoprocésamiento con Sistemas de Información Geográfica (SIG). En los últimos años, se han demostrado excelentes resultados con el uso de herramientas libres [3].

Un estudio realizado en el año 2020 por investigadores de la Universidad Nacional de Costa Rica [4] a partir del uso de imágenes satelitales Landsat, concluyó que las capitales de la región tuvieron un crecimiento significativo entre 1975 y 2014, con un aumento notable en la década de 1990 que se consolidó y aumentó en el 2014. Por esto, la región centroamericana tiene la tasa de urbanización más alta del mundo según el Banco Mundial (2016) citado en [4]. El estudio además concluyó que el área total de las manchas urbanas se triplicó en los últimos cuarenta años por un proceso de periurbanización.

En el caso de El Salvador, la mancha urbana del área metropolitana de San Salvador (AMSS) ha evolucionado espacialmente sin planificación y como consecuencia de forma desordenada lo que ha causado presión, daño y deterioro ambiental en las últimas décadas. La región metropolitana ha tenido un proceso de urbanización acelerado lo que ha causado efectos negativos de múltiples transformaciones en aspectos socioeconómicos y naturales [5]. En el país, ya se dispone de algunas metodologías para identificar la mancha urbana del área metropolitana de San Salvador (AMSS). La OPAMSS ha extraído la mancha urbana a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 con clasificaciones no supervisadas y con validación de expertos. Una tesis de ingeniería informática de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA) en 2022 también hizo el estudio “Análisis de la expansión urbana en el AMSS usando técnicas de teledetección y Machine Learning” en la que se logró extraer la mancha urbana a partir de imágenes

Landsat para cada año de un período de 30 años (1991-2021) usando clasificación supervisada Random Forest la cual se entrenó con una muestra estratificada con puntos de suelo urbano, no urbano y agua [6]. Estudios de esta naturaleza a nivel internacional [7,8] y este, sugieren mejorar la metodología de refinamiento con el uso del índice de edificabilidad de diferencia normalizada (NDBI) ya que son índices que relacionan el espectro electromagnético y el porcentaje de reflectancia asociado a los diferentes materiales [9].

En el año 2017 entró en vigencia el Esquema Director de la Oficina de Planificación Técnica del área metropolitana de San Salvador (OPAMSS) que es el instrumento normativo de planificación territorial para el área metropolitana. Este instrumento consiste en una propuesta de clasificación y tratamientos de suelo que parten de una línea base establecida a partir de escenarios futuros de crecimiento. En la actualidad, la OPAMSS dispone de un sistema de información geográfica (SIG) que tiene la base de datos geográfica de referencia (2014) del Esquema Director, en relación a la clasificación del uso de suelo, sus respectivos tratamientos y aptitudes urbanísticas. Estas bases de datos están disponibles para su consulta por parte de la ciudadanía a través de un geovisor [1]. Sin embargo, no hay una forma para que la población pueda dar seguimiento a los procesos de urbanización y resulta complicado contrastar las propuestas del Esquema Director con la evolución real de los procesos de urbanización.

A partir de lo anterior, el objetivo general de esta investigación es proponer una metodología accesible para la ciudadanía basada en un método de clasificación híbrido de la mancha urbana, para que se pueda realizar un monitoreo espacio temporal al proceso de urbanización en el área metropolitana de San Salvador tomando como referencia el instrumento de planificación normativo vigente. De esta forma se podrá analizar los procesos de urbanización de su entorno y se podría participar más activamente en la creación de propuestas para el ordenamiento y planificación de su territorio. Los objetivos específicos son: delimitar la mancha urbana con alta precisión usando una combinación de índice de vegetación e índice de edificabilidad, analizar la evolución espacio-temporal del proceso de urbanización del municipio de Santa Tecla para el período 1991-2021, identificar la tasa de cambio anual de la mancha urbana en el período 1991-2021 para el municipio de Santa Tecla e identificar espacialmente conflictos de uso de suelo actuales con base en lo planteado en el Esquema Director en el municipio de Santa Tecla.

II. METODOLOGÍA

A. Datos y herramientas

Para este estudio se utilizaron datos vectoriales del geovisor del Esquema Director de la OPAMSS los cuales incluyen la capa vectorial de la clasificación del uso del suelo 2014 y el límite del municipio. Además, se utilizaron las bandas B4, B8 y B11 de las imágenes multitemporales de alta

resolución Sentinel-2A armonizadas correspondientes al período 2018-2021 con el objetivo de calcular imágenes ráster de las medianas de los índices NDVI y NDBI del municipio de Santa Tecla. Se seleccionó el sensor Sentinel-2A por ser imágenes libres y de una alta resolución espacial adecuada para la escala del análisis. La resolución de las imágenes es de 10 metros para todas las bandas y en el caso de la banda 11 esta fue remuestreada. El *dataset* forma parte de la colección de Google Earth Engine bajo el nombre de S2_SR_harmonized [2]. Todas las capas se homologaron con un sistema de referencia de coordenadas universal WGS84 cuyo código es EPSG: 4326. Las imágenes utilizadas corresponden al mes de diciembre de cada año ya que es un mes en El Salvador de época seca y con baja presencia de nubes. Además, fueron corregidas atmosféricamente para filtrar alguna nube o tener un porcentaje de nubes menor al 20 %.

Para el preprocesamiento que incluye la corrección de imágenes, el cálculo de índices y la descarga de los datos se utilizó la plataforma Google Earth Engine (GEE) que ofrece un servicio libre para investigaciones académicas. La selección de esta plataforma se justifica por la velocidad del procesamiento que ofrece en la nube en comparación con tareas locales. Además GEE permite acceder rápidamente a los set de datos de imágenes y con algunas líneas de código permite hacer correcciones atmosféricas, filtrar nubes, remuestrear la resolución y calcular índices de vegetación y edificabilidad. Para la clasificación de imágenes se utilizaron tecnologías libres y de código abierto: el lenguaje R con su interfaz gráfica R Studio y el software QGIS para el geoprocesamiento.

B. Metodología general

Para este estudio se hizo en primer lugar un preprocesamiento que incluyó la corrección de imágenes satelitales, cálculo de índices NDVI y NDBI y descarga de las imágenes ráster con los índices. A continuación, se creó un modelo de clasificación de imágenes que permite extraer la mancha urbana para cada año del período de estudio a partir de índices de vegetación y edificabilidad. Esto se realizó en una primera fase con un método híbrido que combinó los resultados de una clasificación no supervisada con una clasificación supervisada. A continuación, se evaluó la precisión de la clasificación de la mancha urbana para validar el modelo. En una segunda fase, mediante técnicas de geoprocesamiento vectorial y álgebra de mapas se identificaron los conflictos de uso de suelo y finalmente en una tercera fase se calcularon las tasas de urbanización.

La metodología se aplicó a un estudio de caso que es la ciudad de Santa Tecla. En la fig. 1 se resume la metodología:

[1] <https://geovisor.opamss.org.sv/portal/apps/webappviewer/index.html?id=fa433f2657704701be5b146621fa8928>

[2] https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR

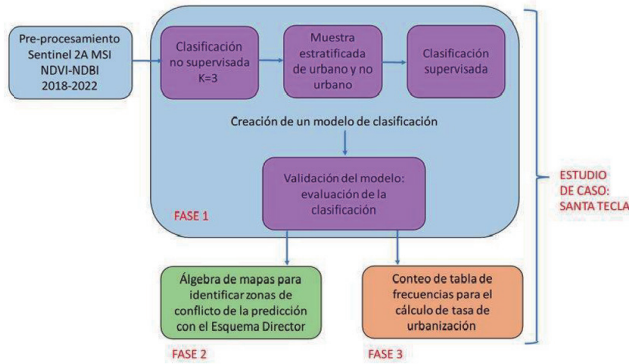


Fig. 1. Metodología general. Elaboración propia

La primera parte del preprocesamiento consistió en la corrección de imágenes satelitales, el cálculo de índices de vegetación y edificabilidad y su correspondiente descarga. Esta etapa fue realizada con la plataforma Google Earth Engine mediante un script en Javascript. Lo que realiza el script es que obtiene dos imágenes raster con las medianas de los índices NDVI y NDBI para el período indicado y las guarda en una nube de almacenamiento para su descarga. La capa vectorial de la clasificación del uso del suelo del Esquema Director fue preprocesada con el software QGIS. En primer lugar se le aplicó una corrección de geometrías para garantizar que los geoprocursos posteriores no fueran a tener errores. En segundo lugar, se aplicó un geoprocuro de corte de la capa con el límite del municipio¹ para delimitar la zona de interés. Como paso final se aplicó un geoprocuro para disolver las geometrías de la clasificación del uso del suelo con el objetivo de simplificarlas.

El método híbrido para clasificar imágenes satelitales de un período de 4 años, consistió en dividir el periodo en dos y crear un modelo de predicción a partir de la clasificación no supervisada de los años 2018 y 2020 respectivamente. Mediante esta técnica aplicada a los índices de vegetación y de edificabilidad se encontraron patrones de agrupamiento para varias categorías. Lo que se espera en esta etapa es que se identifiquen patrones que describen a lo urbano y a la vegetación mediante algoritmos. Los agrupamientos creados por este tipo de clasificación tienen que ser validados por los especialistas de cada fenómeno, esto debido a que el resultado de esta técnica siempre será subjetivo y no existen respuestas absolutas [10]. Para realizar este procedimiento de validación de los patrones se usó el software QGIS y mediante una inspección visual con el apoyo de imágenes satelitales base, se seleccionó la imagen que mejor describe a los agrupamientos. La mejor clasificación se obtuvo con 3 clases, una muestra aleatoria de 1000 unidades y 6 puntos aleatorios de inicio para los centroides.

Para confirmar que los patrones que se encontraron con la clasificación no supervisada pueden ser modelados

mediante aprendizaje automático, se procedió a realizar una clasificación supervisada. Para esto es necesario disponer de una muestra estratificada, es decir proporcional a cada estrato (urbano y no urbano). La muestra se entrenó y a partir de esta se generó un modelo para el año 2018 y otro para el 2020. Los parámetros utilizados en el software R para el modelo de Random Forest se hicieron mediante la librería CARET la cual permite de forma fácil parametrizar la etapa de validación cruzada y algoritmo de Random Forest. El método de validación cruzada que se utilizó fue LOOCV, el cual es un método iterativo que utiliza todos los datos disponibles tanto como entrenamiento como validación. El modelo pudo clasificar de manera acertada con una aproximación del 99 % para el año 2018 y coeficiente Kappa de 0.95 y para el año 2020 se obtuvo una aproximación del 93 % con un coeficiente Kappa superior al 0.72.

Para el post-procesamiento se optó por un enfoque de análisis raster por las ventajas de cómputo. Para esto fue necesario rasterizar la capa de Uso de suelo del Esquema Director. De los posibles usos de suelo se trabajó únicamente con el suelo urbanizable y el no urbanizable. El suelo urbano no se tomó en cuenta ya que este no iba a sufrir cambios. Además, el suelo rural tampoco se consideró en el análisis por ser una categoría que no se está analizando en este estudio. A continuación, se procedió a los cálculos raster con el lenguaje R y la aplicación del álgebra de mapas. El primer caso que se analizó es el del suelo urbanizable del Esquema Director que en el tiempo puede seguir siendo no urbano o pasar a un estado de urbanizado. El otro caso es el del suelo no urbanizable que puede seguir siendo no urbano o haber sido urbanizado. Este último caso es el que permite identificar los conflictos. Mediante el uso de máscaras aplicadas a la capa de entrada y la operación de sustracción se obtuvo nuevos rasters binarios que permitieron hacer la comparación automatizada con el Esquema Director e identificar los conflictos de uso de suelo.

Para calcular la tasa de expansión urbana se obtuvieron para cada año las frecuencias de píxeles por cada tipo de uso de suelo: urbano y no urbano. El cálculo de la tasa de expansión urbana se planteó con la siguiente fórmula de la ecuación 1:

$$\text{Tasa expansión urbana} = \frac{\text{(Cantidad de píxeles urbanos de la zona urbanizable)}}{\text{(Total de píxeles de la zona urbanizable)}} \quad (1)$$

C. Estudio de caso: Santa Tecla

El análisis del proceso de urbanización de esta investigación se centró en la ciudad de Santa Tecla que es la cabecera del municipio de Santa Tecla. El municipio de Santa Tecla pertenece al área metropolitana de San Salvador que está formada por 14 municipios (fig. 2). La ciudad de Santa

¹ Se encontró que la OPAMSS utiliza un límite de municipio diferente al CNR. Sin embargo, para la clasificación del uso de suelo utilizaron los límites del CNR.

Tecla que es la zona urbana del municipio se ubica aproximadamente a 920 msnm. Está ubicada en un valle y está rodeada de importantes elevaciones entre las más importantes están el volcán de San Salvador que pertenece a la cadena volcánica joven al norte de la ciudad y la Cordillera del Bálsamo que pertenece a la Cadena Costera al Sur y por esta razón, la zona urbanizable está limitada a este espacio del valle (fig. 2) [11]. El área rural del municipio ocupa un territorio topográficamente muy accidentado y no apto para la urbanización [12]. En relación al entorno natural del área metropolitana, esta es un área que ha sido afectada históricamente por múltiples amenazas de origen geológico (movimientos de masa por sismos en la Cordillera del Bálsamo), volcánico (erupciones volcánicas o lahares) e hidrometeorológico por su ubicación geográfica. En el año 2001 como consecuencia de un terremoto de alta magnitud hubo un deslizamiento en la parte norte de la Cordillera del Bálsamo hacia una zona residencial del sur de la ciudad “Las Colinas” lo cual se convirtió en desastre por el impacto en 200 viviendas que quedaron soterradas, la cantidad de muertes que fueron alrededor de 585 y los desaparecidos.

La alta vulnerabilidad social y económica de la población combinada con una histórica falta de planificación territorial han sido la causa principal de los desastres provocados por estos eventos socio-naturales. Los impactos de estos desastres a su vez también han influido en la modificación de la estructura urbana ya que han obligado a desplazamientos de la población en las zonas afectadas.

consideración del medio geológico para la construcción, desarrollo y planificación del país.

Las políticas y programas para promover el desarrollo integral del territorio metropolitano y de sus habitantes son formuladas, reguladas, coordinadas y dirigidas por el Consejo de Alcaldes del AMSS (COAMSS). OPAMSS tiene como objetivo proporcionar los criterios técnicos para la planificación al COAMSS. En 1993 se aprobó un marco legal en materia de ordenamiento y planificación territorial para esta área y sus municipios aledaños (LDOT-AMSS). La planificación urbana en el AMSS tiene una historia de un poco más de 50 años y la OPAMSS ha desarrollado, directamente o con el apoyo de especialistas consultores, una serie de instrumentos de planificación encaminados a ordenar y planificar el territorio metropolitano. Sin embargo, la mayoría de estos instrumentos a pesar de haber sido elaborados posteriormente a la LDOT-AMSS no fueron oficializados ni implementados, y solo han servido de referencia técnica para las alcaldías de esta zona.

En la tabla 1 se muestran los diferentes períodos de urbanización analizados indicando los instrumentos de planificación oficiales y no oficiales vigentes de tal forma que se pueda hacer un análisis del proceso de urbanización con base en estos instrumentos. En el año 2004, a solicitud del Estado, se elaboró el Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial (PNODT) [11] el cual incluyó una propuesta de regionalización y sistema de ciudades para el país, sin embargo este nunca se oficializó y solo quedó como documento de referencia técnica. La ley nacional de ordenamiento y desarrollo territorial (LNODT) aprobada en el 2011, tampoco tuvo impacto y si bien retomó la propuesta del PNODT se basó en una división departamental y no en la regionalización recomendada.

Los instrumentos de planificación de la tabla 1 se han estado actualizando por diferentes factores. Algunas justificaciones que se plantearon en el informe [13] para actualizar periódicamente los instrumentos incluyen: su carácter temporal, los cambios en la dinámica urbanística, la rigidez de algunas disposiciones y difícil aplicación de otras, el abordaje urbanístico y la necesidad de una actualización periódica del Esquema Director. Actualmente, el Esquema Director es el instrumento de planificación territorial vigente y fue desarrollado por OPAMSS y aprobado por el COAMSS en el año 2016 y el cual entró en vigencia en el 2017. El Esquema Director da cumplimiento al marco legal del área metropolitana y además tiene como objetivo atender el crecimiento actual y futuro de la ciudad por medio de regulaciones de uso de suelo. Para poder hacer viable la aplicación del PDT-AMSS se incluyó en 2018 la normativa para dar vida a la propuesta.

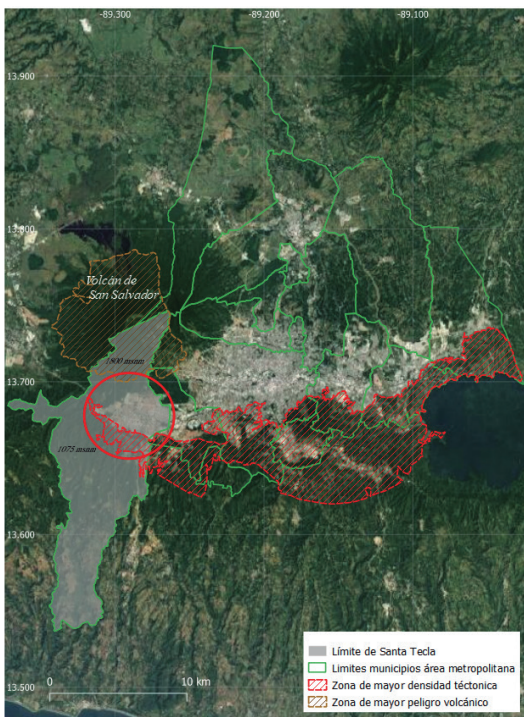


Fig. 2. Caso de estudio. Elaboración propia

En el diagnóstico del PNODT [11] se planteó que los terremotos del 2001 evidenciaron las deficiencias en la

Tabla 1. Instrumentos de Planificación.
Fuente: Fundaungo, UCA, 2016 con actualización propia

Instrumento	Entidad responsable	Año de elaboración	Estado de aplicación
Metroplan 80	MOP	1968	No oficial
Metroplan 2000	OPAMSS	1989	Oficial
Plan Maestro de desarrollo urbano del área metropolitana de San Salvador Ampliada (PLAMADUR)	MOP/VMVDU	1997	No oficial
Plan maestro de transporte del área metropolitana de San Salvador (PLAMATRAN S)	MOP/VMT	1997	No oficial
Plan de ordenamiento y desarrollo territorial de la Subregión Metropolitana de San Salvador (PDT-SRMSS)	MOPNMVDU	2010	No oficial
Directrices de zonificación ambiental y los usos de suelo de la Subregión Metropolitana de San Salvador (ZAUS)	MARN	2011	Oficial
Esquema Director del PDT-AMSS	OPAMSS	2016	Oficial y vigente

El Esquema Director da cumplimiento al marco legal del área metropolitana y además tiene como objetivo atender el crecimiento actual y futuro de la ciudad por medio de regulaciones de uso de suelo. Para poder hacer viable la aplicación del PDT-AMSS se incluyó en 2018 la normativa para dar vida a la propuesta. La normativa implicó modificaciones en el Reglamento de la Ley de ordenamiento y desarrollo territorial para el área metropolitana y municipios aledaños. Un aspecto a resaltar es que el decreto 10 de la normativa viabiliza la urbanización de zonas no urbanizables a través de un recurso de cambio de uso de suelo. Por lo tanto, para urbanizar se tiene que someter a una serie de estudios técnicos establecidos en el reglamento PDT-AMSS, otros estudios que se estimen convenientes y someterse a las respectivas compensaciones urbanísticas y ambientales que se establecen en el decreto.

Este instrumento se construyó en tres etapas que incluyeron un diagnóstico, una prospectiva y la propuesta. El diagnóstico estratégico se hizo a partir de la situación socioeconómica, natural y urbano territorial de la época de referencia que es el año 2014. En este se plantearon las

principales problemáticas y potencialidades del territorio metropolitano. En la siguiente etapa se trabajó una prospectiva con base en el diagnóstico anterior considerando tres escenarios para los subsistemas de población, asentamientos urbanos, infraestructura ambiental y económica. La OPAMSS optó por el escenario intermedio debido a que según sus criterios representaba una visión más realista de lo que podría ocurrir en el territorio. En esta etapa se trabajó la línea base con los subsistemas de población, ambiental, asentamientos e infraestructura y sus respectivas variables e indicadores medibles. Para definir el escenario actual de la línea base se identificaron los principales problemas territoriales y las potencialidades del área metropolitana. En la última etapa, la cual se trabajó a partir de este escenario intermedio se hizo una propuesta de esquema director para la clasificación del uso del suelo, tratamientos urbanísticos y lineamientos normativos de edificabilidad y uso de suelo. El esquema director también incluye un banco de proyectos estratégicos a nivel metropolitano. La dimensión ambiental fue incluida de manera transversal en todas las etapas y quedó plasmada en la Evaluación Ambiental Estratégica [14].

El escenario intermedio del Esquema Director para el 2030, a partir de supuestos, plantea un equilibrio territorial tomando en cuenta limitaciones financieras y falta de suelo para intervenir entre otros. El escenario intermedio contempla una combinación de baja densidad con alta densidad, constituye el Esquema Director y ha sido la base para este estudio. A partir de los años 90 los suelos susceptibles a urbanizar en la Subregión donde se ubica Santa Tecla han determinado soluciones muy forzadas para el crecimiento urbanísticos y esto ha conducido a la ocupación de laderas de la Cordillera del Bálsamo y de las faldas del volcán de San Salvador lo cual tiene efectos muy negativos aumentando los riesgos geológicos y a inundaciones en época lluviosa [12]. En la fig. 3 se puede visualizar los usos de suelo propuestos en el Esquema Director vigente y se puede observar que el suelo urbanizable ya es muy limitado en la ciudad. Lo anterior ha llevado a la expansión urbana en municipios fuera del área metropolitana como Lourdes Colón al occidente de la ciudad y a retomar como lo plantea el Esquema Director un enfoque de ciudad compacta con una expansión vertical que ya se había planteado en los años 70s pero que nunca se adoptó.

Es importante mencionar que el suelo urbanizable vigente propuesto en el occidente de la ciudad es muy accidentado. Este suelo urbanizable está ubicado en laderas con alta susceptibilidad a deslizamientos que ya han sido señaladas como zonas de alto riesgo en instrumentos anteriores como el PDT-RMSS y en el mismo Esquema Director que clasifica esa zona como de mayor densidad tectónica.

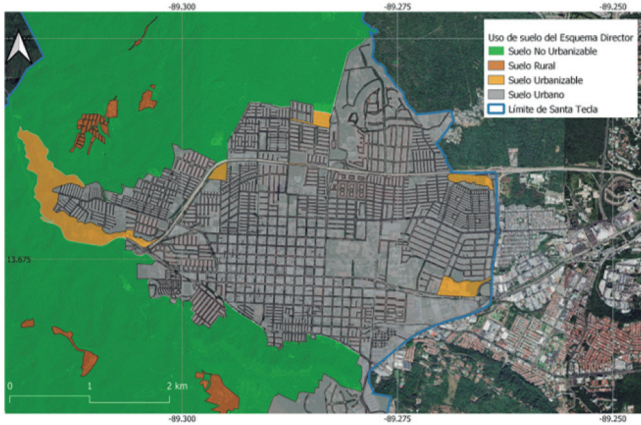


Fig. 3. Esquema Director. Elaboración propia

En la fig. 4 se observa la evolución de la mancha urbana de Santa Tecla en un período de 30 años del 1991-2021 a partir de los datos del estudio [6]. Con base en el mapa se observa que el período donde hubo más expansión urbana horizontal fue el comprendido entre 1991 y 1996 o antes. Se comprueba que a pesar de que Metroplan 2000 era el instrumento vigente en ese período que buscaba frenar la expansión urbana horizontal, tuvo un resultado opuesto ya que la potenció [5]. Los resultados del cálculo de la tasa de urbanización, es decir la proporción de suelo urbano con respecto al suelo del municipio mostraron una tendencia al crecimiento en el período. Entre 2001 y 2011 el proceso de urbanización se comenzó a desacelerar. El instrumento de planificación oficial era siempre Metroplan 2000 aunque se tenían como referencia técnica el PLAMADUR y el Plan Maestro de Transporte del AMSS, ambos elaborados a partir de 1997.

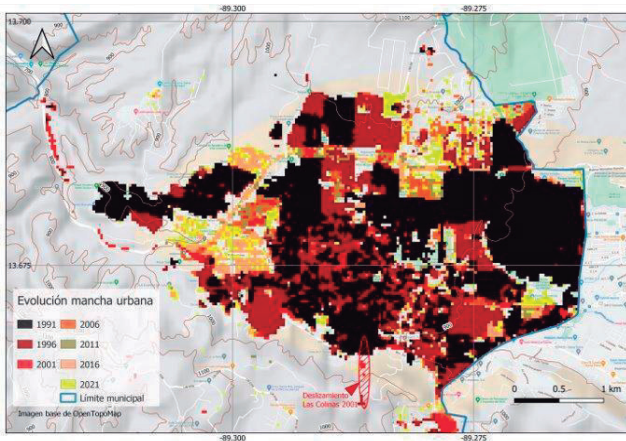


Fig. 4. Proceso de urbanización en Santa Tecla en el período 1991-2021. Elaboración propia

En el período entre los años 2011-2016 se construyeron los residenciales el Condado Santa Rosa y el Residencial Villa Veranda. Los instrumentos oficiales eran Metroplan 2000 y las directrices de zonificación ambiental (ZAUS) del Ministerio de Medio Ambiente (MARN). El instrumento

técnico de referencia para este período fue el PDT-SRMSS. Finalmente, en el último período (2016-2021) ya con el Esquema Director del 2016 vigente, en la ciudad de Santa Tecla solo se ha consolidado tejido urbano. La zona urbanizable al occidente de la ciudad aún no se ha urbanizado. El Esquema Director y las ordenanzas de uso de suelo del municipio tuvieron que incorporar las directrices de ZAUS.

III. RESULTADOS

A. Fase 1: aplicación del modelo 2018-2021

En la fig. 5 se muestra el resultado de la delimitación de la mancha urbana para el período entre el 2018 y 2021 usando el modelo de predicción híbrido con imágenes satelitales Sentinel-2A. Se observa una mayor resolución que con las imágenes Landsat y la mancha urbana fue clasificada con bastante precisión al refinar la clasificación con el índice de edificabilidad (NDBI). En general, se observa una mancha urbana estable para este período de 4 años y no se perciben cambios significativos.

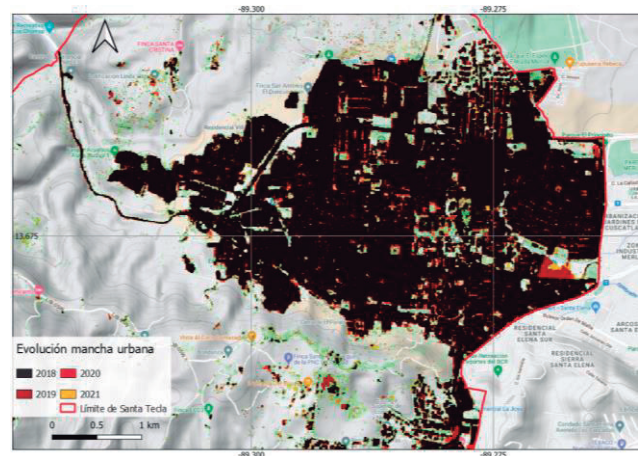


Fig. 5. Estimación de la mancha urbana para el período 2018-2021 con imágenes Sentinel 2-A. Elaboración propia

B. Fase 2: conflictos de uso de suelo

En los mapas de las figs. 6 y 7 al contrastar las áreas del Esquema Director con la imagen estimada del 2018 se observa: la evolución de la urbanización en suelo urbanizable (color azul), las zonas urbanizables (color naranja) y los conflictos cuando se ha urbanizado en zonas no urbanizables (color rojo). Se observa que para este período el conflicto ya se presentaba desde un inicio. En la imagen Landsat se observa que el conflicto ocurrió entre 2016 y 2018 con la construcción de la residencial Puerta Real que sobrepasó los límites y urbanizó en suelo no urbanizable. Como se ha mencionado anteriormente, en diversos instrumentos de planificación se ha indicado el alto riesgo en Santa Tecla o San Salvador de urbanizar las faldas del volcán de San Salvador o la cordillera del Bálamo ya que representan zonas de máxima protección. Este conflicto identificado deberá de

ser validado por especialistas. Además, en la zona rural del municipio se observan zonas rojas debido a que el suelo rural es considerado como urbano al no ser vegetación. Como se puede observar en los mapas, el crecimiento expansivo horizontal de la ciudad ha disminuido respecto a los años anteriores.

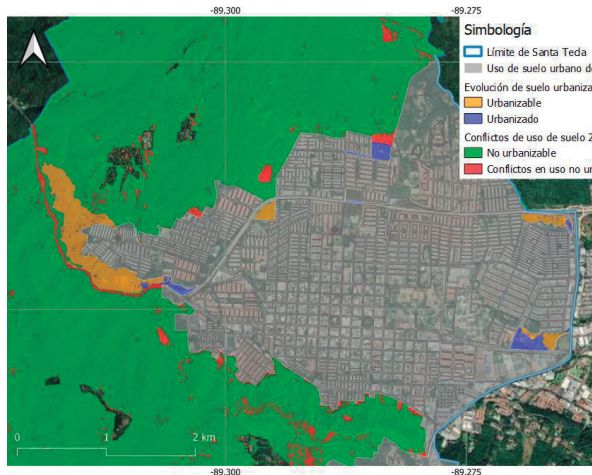


Fig. 6. Conflictos de uso de suelo en Santa Tecla. Elaboración propia a partir de datos del Esquema Director de OPAMSS, 2016

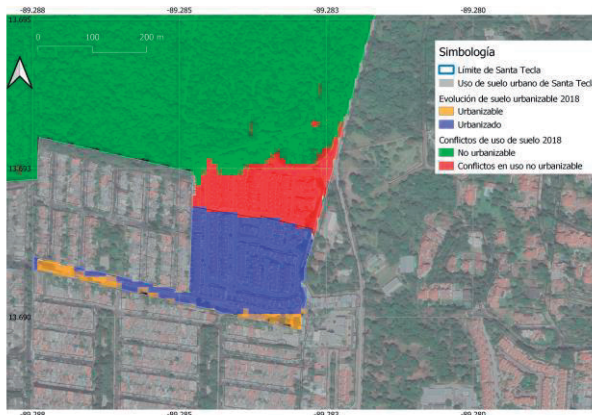


Fig. 7. Conflictos de uso de suelo Santa Tecla. Elaboración propia a partir de datos del Esquema Director de OPAMSS, 2016

En los resultados también es importante comparar la mancha urbana que se extrae con Landsat (ver fig. 8) y contrastarla con la que se extrae con Sentinel para el mismo período (ver fig. 9).

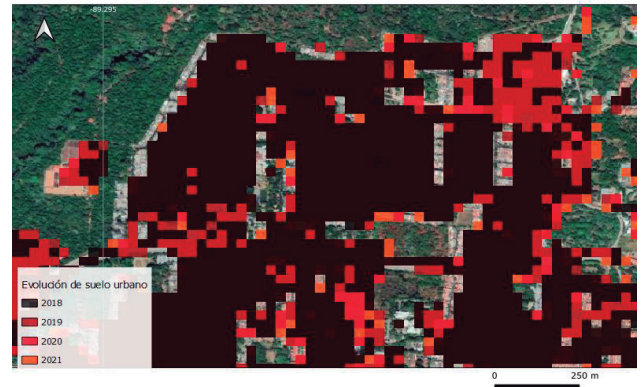


Fig. 8. Evolución 2018-2021 con Landsat. Elaboración propia a partir de datos de Rosales, 2022



Fig. 9. Evolución 2018-2021 con Sentinel. Elaboración propia con QGIS a partir de datos propios e imagen base Google Hybrid

Se puede observar que si bien Landsat brinda la posibilidad de hacer análisis evolutivos para períodos grandes tiene la desventaja de tener una resolución baja con respecto a la de Sentinel y como consecuencia esto puede causar algunos errores en los cálculos. Por otro lado, el haber combinado índices NDBI con NDVI para extraer la mancha urbana resultó más exacto como se observa en la fig. 9.

Finalmente, para obtener la tasa de crecimiento urbano anual del período 2018-2021 con imágenes Sentinel se obtuvo para cada año las frecuencias de píxeles estimados por cada tipo de uso de suelo: urbano y no urbano. El resultado indicó un aumento de la tasa entre 2018 y 2019, mientras que posterior a este año hay una tendencia a la disminución.

IV. CONCLUSIONES

La combinación del índice de edificabilidad (NDBI) con el índice de vegetación (NDVI) tal como se sugería en investigaciones previas, como entradas para un método híbrido de clasificación de imágenes, permitió analizar la expansión horizontal de la zona de Santa Tecla en un período de tiempo determinado, a cambio de un margen de error aceptable.

En los últimos 30 años, la aplicación del marco legal en materia de ordenamiento y planificación territorial ha sido flexible: la mayoría de instrumentos no han sido oficializados, el reglamento LDOT-AMSS viabiliza la urbanización de zonas no urbanizables a través del recurso de cambio de uso de suelo ocasionando un proceso desordenado con el que se ha contribuido a la construcción del riesgo de desastre en un entorno de cambio climático.

Se requiere de una política de ordenamiento y planificación territorial a largo plazo en armonía con el entorno natural que sirva de base a los instrumentos de planificación en los niveles nacional, metropolitano y local de tal forma que exista una articulación y que no se propongan como urbanizables zona de riesgo.

RECOMENDACIONES

En un futuro, para la expansión urbana vertical, se recomienda la incorporación de sensores tipo Sentinel-1 al modelo ya que permiten la medición de la expansión urbana vertical la cual es contemplada el Esquema Director como modelo de desarrollo y que se está observando recientemente. La metodología se puede aplicar a otros municipios de la zona con características similares de uso de suelo y se convierte en sostenible ya que está basada en tecnologías libres. Se recomienda siempre hacer una validación manual para validar el resultado.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece al director del trabajo el Dr. Ángel Miramontes Carballada, catedrático e investigador del departamento de Geografía de la Universidad Santiago de Compostela, Galicia y director de la Fundación CEER; a Felipe Carranza, investigador independiente por sus colaboraciones en el código fuente y a las comunidades de desarrollo de software libre y de código abierto de R y QGIS por poner a disposición su software para el análisis SIG, la cartografía y su aporte a la ciencia abierta.

REFERENCIAS

- [1] Cavour, M. e. a. (2019). Land use and land cover classification of Sentinel-2A: St Petersburg case study. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-1/W2*.
- [2] Makandar, A., & Kama, S. (2021). Land use land cover study of Sentinel-2A and Landsat-5 images using NDVI and supervised classification techniques. <https://doi.org/10.21917/ijivp.2021.0365>.
- [3] Nolè et al., G. (2014). Evaluation of urban sprawl from space using opensource technologies, *Ecological Informatics*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.05.005>.
- [4] Vargas, C., Orozco, R., Vargas, A., Aguilar, J. (2020). Metodología para la determinación del crecimiento de la mancha urbana en las capitales de la región centroamericana (1975-1995-2014)- *Revista Geográfica de América Central*, vol. 1, núm. 64, pp. 59-91.
- [5] Fuentes, P. (2001). Síntesis del plan estratégico PLAMADUR AMSS. *La Casa de todos. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas*.
- [6] Rosales, C., Merino, J., Renderos, D., & Trigueros, C. (2022). Análisis de la expansión urbana en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) y el municipio de Colón de El Salvador.
- [7] Kuc, G., & Chormanski, J. (2019). Sentinel-2 Imagery for mapping and monitoring impreviuousness in urban areas. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-1/W2*.
- [8] Macarof, P., & Statescu, F. (2017). Comparison of NDBI and NDVI as indicators of surface urban heat island effect in Landsat 8 imagery: A case study of IASI. *PESD, 11(2)*.
- [9] Kshetri, T. (2018). NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7, 8. <https://www.linkedin.com/pulse/ndvi-ndbi-ndwi-calculation-using-landsat-7-8-tek-bahadur-kshetri/>.
- [10] Berzal, F. (2018). *Redes Neuronales and Deep Learning: Edición en Color*. Independently Published.
- [11] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (MARN), Viceministerio de Vivienda y desarrollo territorial, y Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2004). *Plan nacional de ordenamiento y desarrollo territorial. Diagnóstico*.
- [12] Viceministerio de vivienda y desarrollo urbano. (2011). *Plan de desarrollo territorial para la subregión metropolitana de San Salvador. Santa Tecla. Síntesis Municipal*.
- [13] COAMSS, OPAMSS, FundaUngo, UCA. (2016). Sistematización del esquema director Plan de desarrollo territorial del área metropolitana de San Salvador PDT-RMSS.
- [14] OPAMSS. (2016). *Esquema Director. Resumen ejecutivo. Área Metropolitana de San Salvador*. <https://opamss.org.sv/wp-content/uploads/2022/04/ResumenED.pdf>.